

Х. А. ДЖЕРПЕТОВ и А. А. ЗАЙЦЕВ

СЛОИСТЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РАЗРЯД

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 17 II 1953)

Подобно положительному столбу разряда на постоянном токе, высокочастотный разряд может быть слоистым (¹). На это обстоятельство до сих пор не обращалось должного внимания, и при исследовании слоев ограничивались случаем разряда постоянного тока. Интерес к слоистому высокочастотному разряду вызывается тем, что между высокочастотным разрядом и столбом имеется весьма существенное различие.

Для высокочастотного разряда и положительного столба являются общими процессы, определяющие рождение заряженных частиц и их потери. Однако баланс энергии для частиц в высокочастотном разряде достигается при других условиях, чем в столбе. В столбе электроны получают энергию от постоянного поля и вместе с тем они приобретают, в среднем по времени, направленную скорость в сторону анода. Поэтому столб никогда не обладает симметрией относительно середины. В высокочастотном разряде электроны получают энергию от переменного поля. Радиальное поле и здесь возникает, но стационарное поле, соответствующее продольному градиенту потенциала, в столбе не существует. Поэтому высокочастотный разряд нормально имеет симметрию относительно середины.

Различные теории, выдвинутые для объяснения расслоения столба, основываются на факте существования среднего по времени дрейфа заряженных частиц в разряде на постоянном токе (¹, ²). В симметричном высокочастотном разряде нет преимущественного направления движения, вызванного полем, а слои все же возникают.

В работе исследованы условия возникновения стоячих и подвижных слоев в высокочастотном разряде. Основные измерения проводились на частоте переменного напряжения в $6 \cdot 10^6$ гц. Однако наблюдения велись и на частоте в 10^8 гц. Характер явления остается без изменений и, в частности, было установлено, что при прочих равных условиях период слоя имеет одинаковую величину как на частоте в $6 \cdot 10^6$ гц, так и на частоте в 10^8 гц.

Трубки наполнялись неоном или аргоном. Электроды помещались либо внутри трубки либо вне ее. В первом случае для получения симметричного разряда электроды выполнялись в виде дисков одинакового размера, заполнявших почти все сечение трубки. Симметрия высокочастотного разряда относительно середины нарушается, если разряд вызывается между электродами неодинакового размера и разной формы. Для создания явной асимметрии один электрод выполнялся в виде диска, другой — в виде проволочной спирали или просто куска проволоки. Наружными электродами служили кольца из алюминия. Условия симметрии при наружных электродах целиком определяются расположением электродов и геометрией трубки.

При диффузионном режиме в симметричном высокочастотном разряде возникают стоячие слои. Для формирования слоев требуется извест-

ный минимум плотности тока. Слои появляются сначала как расплывчатые образования, не имеющие резких границ. По мере увеличения тока очертания слоев делаются все более выраженными, и при плотности тока в 4—5 ма/см² выступает достаточно резкая для наблюдения периодическая структура. Зондовые измерения показывают, что с появлением слоев устанавливается периодическое по длине трубки стационарное распределение плотности заряженных частиц и потенциала. Все слои в высокочастотном разряде одинаково резки и число их ограничивается длиной трубки.

Одно из ярко выраженных свойств слоистого высокочастотного разряда состоит в том, что появление или исчезновение каждого слоя при изменении расстояния электродов d происходит скачкообразно. В промежутке между изменениями их числа все слои в одинаковой мере или сжимаются, если d уменьшается, или расширяются, если d растет. Изменение числа слоев сопровождается одинаковыми для всех слоев изменениями их периода. Когда электроды раздвигаются, $n + 1$ -й слой возникает при большем расстоянии, чем он исчезает при сближении (гистерезис). Вследствие гистерезиса при одной и той же длине, в зависимости от истории, число слоев в разряде может быть n или $n + 1$. При непрерывном увеличении тока общее число имеющихся в разряде слоев последовательно уменьшается на один слой. Процесс этот также протекает скачкообразно. Между изменениями числа слоев с ростом тока растет отношение ширины слоя к ширине темной области. Поскольку число слоев в трубке определенной длины уменьшается с током, то период слоя при этом, в общем, увеличивается.

Симметрия разряда находит свое выражение, между прочим, в характере образования и исчезновения слоев. Слои возникают или исчезают в середине разряда. Если число слоев нечетно, то новый слой возникает путем распада центрального слоя на два. Если число слоев четно, то распадается на два один из слоев, примыкающих к плоскости симметрии слева или справа. Исчезновение слоя происходит в обратном порядке: либо путем слияния центрального слоя с одним из смежных с ним слоев, либо путем слияния двух слоев, прилегающих к плоскости симметрии.

Процесс изменения числа слоев сопровождается нарушением на некоторое время равновесия объемных зарядов. Каждый раз равновесие восстанавливается благодаря диффузии заряженных частиц. В течение времени, пока не восстановится новое равновесие, слои приходят в движение.

Явления, связанные с неподвижными слоями, протекают совершенно одинаково, независимо от того, помещены ли электроды внутри трубки или вне ее.

В табл. 1 сопоставлены периоды слоев в неоне при различных диаметрах трубки.

Таблица 1

Ne, $p = 1,8$ мм рт. ст.; $j = 4$ ма/см ²				
d , см	1,1	1,7	2,1	3
L , см	1,3	1,9	2,5	3,6

Зависимость периода от радиуса и давления в неоне и аргоне с хорошим приближением описывается эмпирической формулой:

$$L = Cr^{1-m} p^m, \quad (1)$$

если положить $m = 1/6$. Таким образом, влияние стенок и давления на размеры слоя имеет такой же характер, как и в столбе на постоянном токе. Закономерности слоев в высокочастотном разряде совпадают с закономерностями, имеющими место в неподвижных слоях, возникающих в положительном столбе в молекулярных газах. На этом основании следует заключить, что природа слоев как в инертных газах, так и в моле-

кулярных газах одна и та же и что они, таким образом, вызываются одним механизмом. Подвижные слои наблюдаются в тех случаях, когда в высокочастотном разряде имеется среднее по времени направленное вдоль оси движение варяженных частиц. Такое положение, естественно, возникает в несимметричном разряде. Причинами преимущественного направления движения являются среднее по времени направленное поле и градиент плотности заряженных частиц.

Нарушение симметрии можно вызвать различными способами.

1. В тех же трубках и при тех же условиях давления и тока, при которых разряд с двумя электродами был симметричным, а слои неподвижными вызывался одноэлектродный высокочастотный разряд с наружным электродом. Если электрод расположить посредине трубки, то яркость свечения разряда заметно падает от середины трубки к ее концам. Разряд с непрерывным на вид свечением в действительности оказывается слоистым и слои движутся в обе стороны от центра трубки к ее концам. Если же электрод поместить ближе к одному концу трубки, то слои также возникают и они движутся к другому концу.

2. Когда внутренние электроды разрядного промежутка отличаются один от другого по форме или по размерам, разряд становится явно несимметричным. Такой разряд обладает выпрямляющим свойством. Поэтому ток во внешней цепи будет заключать постоянную и переменную составляющие. Несимметричный разряд распадается на подвижные слои, скорость движения которых зависит от величины постоянной составляющей. Поэтому естественно считать, что движение слоев связано с прохождением постоянного тока. Следующий опыт убеждает нас в этом.

В цепь разряда последовательно включается конденсатор. Тем самым для постоянного тока цепь будет разорвана, но для переменного тока она останется замкнутой, и разряд возникает. Конденсаторы выбирались разной емкости ($C = 50 \text{ pF}$, $2 \text{ }\mu\text{F}$, $8 \text{ }\mu\text{F}$, $16 \text{ }\mu\text{F}$). Во всех случаях вместо подвижных слоев появляются стоячие слои.

Необходимо выяснить, отличаются ли в данном случае подвижные слои по механизму и по характеру от неподвижных или же они представляют собой образования одного и того же рода. Для этого надо экспериментально получить ответы на два вопроса: 1) можно ли привести в движение стоячие слои и затем управлять их скоростью и 2) можно ли остановить подвижные слои путем их замедления.

И то и другое можно осуществить. Если пластины конденсатора замкнуть через ключ на омическое сопротивление, то цепь для постоянного тока замкнется, и конденсатор зарядится более или менее быстро, в зависимости от величины сопротивления. Стоячие слои приходят в движение. Их скорость возрастает по мере зарядки конденсатора и достигает наибольшего значения, когда конденсатор перестает заряжаться. Наоборот, если разомкнуть ключ, то конденсатор вновь начинает заряжаться, и напряжение на нем начинает расти. По мере того как конденсатор заряжается, разность потенциалов, заставляющих протекать постоянный ток, уменьшается, вследствие чего ток и скорость изменения напряжения на конденсаторе также уменьшаются. Одновременно уменьшается скорость перемещения слоев и, наконец, они останавливаются.

Зарядка конденсатора, как и его разрядка, представляет собой экспоненциальный процесс. Именно это обстоятельство обуславливает медленное уменьшение тока в конце зарядки и делает возможным непосредственное и непрерывное наблюдение за движением слоев и изменением их скорости перед остановкой. Опыт получается более эффективным при большей емкости, так как при этом растет постоянная времени RC . Выпрямляющее свойство высокочастотного разряда подвержено некоторой флуктуации. Вследствие этого вполне спокойные стоячие слои появляются при сравнительно большой емкости (несколько микрофард). При малой емкости слои дрожат.

Таким образом доказано, что в данном случае подвижные и неподвижные слои, представляют собой одно и то же образование. Неподвижные слои, наблюдаемые в симметричном разряде, становятся подвижными вследствие появления при нарушении симметрии среднего по времени направленного движения заряженных частиц и постоянной составляющей тока.

При уменьшении скорости слоев в разряде появляется видимая неоднородность в свечении несколько раньше, чем слои останавливаются. Причиной этого является неравномерное движение слоев. Скорость слоев, постоянная при быстром движении, становится переменной при замедленном их движении перед остановкой. Слои замедляют свое движение все одновременно как раз в тех местах, где они при дальнейшем уменьшении тока полностью останавливаются, и переходят в стоячие. Одни и те же слои воспринимаются как более яркие там, где они имеют наименьшую скорость перемещения. Поскольку при этом неподвижных слоев фактически нет и разряд воспринимается как неоднородный вследствие периодического изменения скорости подвижных слоев, то возникающие неоднородности целесообразно называть квазистационарными⁽³⁾.

Сами слои своим движением обуславливают причину, вызывающую периодическое изменение их скорости. Выпрямляющее действие высокочастотного разряда выражено тем сильнее, чем менее он симметричен. Слои при своем движении периодически модулируют режим объемного заряда и поля на границах разряда и этим непрерывно изменяют условия симметрии. Поэтому постоянная составляющая тока должна колебаться по величине. Колебания тока действительно наблюдаются. С ростом постоянной составляющей тока колебания начинают играть относительно меньшую роль. Скорость слоев постепенно выравнивается и разряд становится на вид совершенно однородным.

Если не приняты надлежащие меры, то при больших токах свечение появляется в пространстве за электродами. Иногда это сопровождается изменением направления постоянной составляющей тока. В таких случаях направление движения слоев меняется на противоположное.

Сведения, полученные о высокочастотном разряде, приводят к общему выводу, что в несимметричном столбе, свободном от жестких условий на его концах, слои могут находиться лишь в движении. Скорость перемещения слоев в электроположительных газах должна быть порядка средней скорости дрейфа положительных ионов. Этот вывод не противоречит тому общеизвестному факту, что в столбе на постоянном токе и, в особенности, в молекулярных газах наблюдаются стоячие слои. Слоистый столб представляет собой систему зон усиленной ионизации, связанных между собой полем объемного заряда. Кроме того, в разряде на постоянном токе слои, прилегающие к катодной и анодной областям, непосредственно связаны с условиями в этих областях. В тех случаях, когда в столбе возникают стоячие слои, режим в катодной и анодной областях бывает стабильным. Именно стабильность процессов на концах столба и, главным образом, у катодного конца связывает слои в пространстве разряда и делает их неподвижными. В тех же случаях, когда возникают нестабильности на границах столба, слои приходят в движение. Это и наблюдается обычно в инертных газах. Однако скорость слоев в разряде постоянного тока определяется уже не скоростью ионов, а частотой изменения процессов, протекающих в катодной области, и в некоторых случаях, также процессов в анодной области.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Поступило
17 II 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ А. А. Власов, Теория многих частиц, 1950; А. А. Власов, И. П. Базаров, ЖЭТФ, 20, 1098 (2950). ² Б. Н. Клярфельд, ЖЭТФ, 22, 66 (1952) ³ А. А. Заичев, Вестн. Моск. ун-та, № 10, 41 (1951).